

Spis treści

Wybrane oznaczenia	13
1. Wstęp	17
1.1. Motywacja	18
1.2. Cele i zakres opracowania	18
1.2.1. Cele	18
1.2.2. Zakres opracowania	19
1.3. Przegląd literatury	21
1.3.1. Modele matematyczne wymiany ciepła w żywych tkankach	21
1.3.2. Modele całego ciała	23
1.3.3. Lokalne modele tkanek	24
2. Pojęcia podstawowe	26
2.1. Pole temperatury	26
2.1.1. Strefy tkanek	26
2.1.2. Temperatura ciała	26
2.2. Wymiana ciepła	29
2.2.1. Przewodzenie ciepła	29
2.2.2. Konwekcja ciepła	31
2.2.3. Promieniowanie cieplne	32
2.2.4. Parowanie	35
2.3. Równanie bilansu energii ciała człowieka	36
2.3.1. Stan termoneutralny	36
2.3.2. Bilans energii	36
2.4. Termogeneza i źródła ciepła wewnętrznego (metabolicznego)	37
2.4.1. Podstawowa przemiana materii (PPM)	38
2.4.2. Strumień ciepła wewnętrznego (metabolicznego)	38
2.4.3. Pole powierzchni skóry człowieka	39
2.5. Równanie przewodzenia ciepła	39
2.5.1. Przewodzenie	40
2.5.2. Generacja	40

2.5.3. Akumulacja	41
2.6. Równanie różniczkowe przewodzenia ciepła	41
3. Modelowanie wymiany ciepła w tkankach ciała człowieka	43
3.1. Przepływ krwi w tkankach	43
3.1.1. Zmiany temperatury krwi w układzie krwionośnym	43
3.1.2. Wyrównanie temperatury krwi i tkanek	45
3.2. Równanie przewodzenia ciepła (biociepła) w tkankach	45
3.2.1. Ciepło perfuzji	47
3.2.2. Równanie bilansu energii dla tkanek	48
3.3. Równanie różniczkowe przewodzenia ciepła (biociepła) w tkankach	49
3.4. Pasywny model wymiany ciepła w tkankach	50
4. Modelowanie procesów termoregulacji w ciele człowieka	51
4.1. Termoregulacja	51
4.1.1. Termoregulacja autonomiczna	51
4.1.2. Termoregulacja behawioralna	51
4.1.3. Termoregulacja techniczna	52
4.1.4. Schemat blokowy systemów termoregulacji	52
4.2. Fizjologia termoregulacji autonomicznej	52
4.2.1. Wartość zadana	53
4.2.2. Schemat regulacji	54
4.2.3. Aktywność receptorów zimna i ciepła	55
4.2.4. Progi wyzwalania mechanizmów termoregulacji	56
4.3. Model pasywnej termoregulacji autonomicznej	56
4.3.1. Reguła van't Hoffa	57
4.3.2. Wpływ zmian temperatury tkanek na tempo metabolizmu	58
4.3.3. Wpływ zmian temperatury tkanek na ich perfuzję	58
4.3.4. Energetyczny równoważnik współczynnika perfuzji	59
4.4. Model termoregulacji autonomicznej aktywnej	60
4.4.1. Perfuzja	60
4.4.2. Termogeneza drżeniowa	61
4.4.3. Pocenie	62
5. Pomiary właściwości termofizycznych	64
5.1. Pomiar właściwości termofizycznych materiałów kompresu	64
5.1.1. Sprzęt i aparatura laboratoryjna	64
5.1.2. Wyniki pomiarów właściwości termofizycznych	65

6. Eksperymenty medyczne oraz pomiary <i>in vivo</i>	66
6.1. Pomiar temperatury skóry poddanej termostymulacji (A)	67
6.1.1. Stanowisko badawcze i sprzęt pomiarowy (A)	67
6.1.2. Protokół pomiarowy (A)	69
6.2. Pomiar strumienia przekazywanego ciepła i temperatury kompresu (B)	72
6.2.1. Stanowisko badawcze i sprzęt pomiarowy (B)	72
6.2.2. Protokół pomiarowy (B)	73
6.3. Wyniki pomiarów <i>in vivo</i>	75
6.3.1. Eksperyment medyczny nr 1 - protokół (A)	75
6.3.2. Eksperyment medyczny nr 2 - protokół (B)	77
6.3.3. Walidacja pomiaru strumienia ciepła w eksperymencie medycznym nr 2 - protokół (B)	79
7. Model numeryczny lokalnego ochładzania skóry – elementy wspólne	84
7.1. Oprogramowanie do analizy numerycznej	85
7.2. Założenia i uproszczenia	86
7.3. Model matematyczny	87
7.4. Funkcje własne użytkownika (UDF)	89
7.5. Właściwości termofizyczne	89
8. Model numeryczny I oraz walidacja modelu	91
8.1. Model numeryczny tkanek otoczonych powietrzem (termoregulacja pasywna)	91
8.1.1. Geometria modelu	92
8.1.2. Dyskretyzacja i rozwiązywane równania	92
8.1.3. Siatka podziału numerycznego	94
8.1.4. Warunki brzegowe, początkowe i właściwości materiałów	95
8.2. Sekwencja i etapy symulacji numerycznych	95
8.2.1. Stan ustalony (termoneutralny)	96
8.2.2. Stan nieustalony 1 (chłodzenie skóry)	97
8.2.3. Stan nieustalony 2 (powrót do normotermii)	98
8.3. Walidacja modelu numerycznego (termoregulacja pasywna)	99
8.3.1. Opór kontaktowy	99
9. Model numeryczny II oraz walidacja modelu	102
9.1. Model numeryczny tkanek (termoregulacja pasywna)	102
9.1.1. Geometria modelu	103
9.1.2. Dyskretyzacja i rozwiązywane równania	103
9.1.3. Siatka podziału numerycznego	104

9.1.4.	Warunki brzegowe, początkowe i właściwości materiałów	105
9.1.5.	Opór kontaktowy	106
9.2.	Sekwencja i etapy symulacji numerycznych	107
9.2.1.	Stan ustalony (termoneutralny)	107
9.2.2.	Stan nieustalony (chłodzenie skóry)	108
9.3.	Walidacja modelu numerycznego (termoregulacja pasywna)	110
9.3.1.	Strumień ciepła	110
9.3.2.	Temperatura kompresu chłodzącego	111
10.	Model numeryczny III oraz analiza wrażliwości i walidacja modelu	113
10.1.	Model numeryczny tkanek (termoregulacja pasywna)	113
10.1.1.	Geometria modelu	114
10.1.2.	Dyskretyzacja i rozwiązywane równania	114
10.1.3.	Siatka podziału numerycznego	115
10.1.4.	Warunki brzegowe, początkowe i właściwości materiałów	116
10.2.	Sekwencja i etapy symulacji numerycznych	117
10.2.1.	Stan ustalony (termoneutralny)	117
10.2.2.	Stan nieustalony 1 (chłodzenie skóry)	118
10.2.3.	Stan nieustalony 2 (powrót do normotermii)	119
10.3.	Analiza wrażliwości wynikowego pola temperatury ze względu na główne parametry modelu	119
10.3.1.	Współczynnik wrażliwości	120
10.3.2.	Analiza wrażliwości	120
10.3.3.	Wyniki	121
10.3.4.	Średnie wartości współczynników wrażliwości	131
10.4.	Walidacja modelu numerycznego (termoregulacja pasywna)	132
11.	Model numeryczny IV oraz jego walidacja	134
11.1.	Model numeryczny tkanek (termoregulacja aktywna)	134
11.1.1.	Rozwiązywane równania	135
11.2.	Walidacja modelu numerycznego (termoregulacja aktywna)	135
12.	Porównanie wariantów modeli termoregulacji i wymiany ciepła w tkankach	137
12.1.	Stan ustalony (termoneutralny)	138
12.2.	Stan nieustalony 2	139
13.	Podsumowanie i wnioski	141
13.1.	Podsumowanie	141

13.2. Dyskusja	142
13.3. Wnioski	145
Bibliografia	147
Źródła internetowe	156
Dokumenty elektroniczne	158
Dodatki	159
A. Uzasadnienie stosowania punktowego pomiaru jako reprezentatywnego dla średniej masowej (objętościowej) temperatury całego kompresu	159
B. Kody źródłowe funkcji własnych użytkownika (UDF)	161
B.1. Warunek brzegowy (dla symulacji stanów ustalonego i nieustalonego) . . .	162
B.2. Człony źródłowe równania biociepła Pennesa bez termoregulacji (dla symulacji w stanach ustalonym i nieustalonym)	163
B.3. Człony źródłowe równania Pennesa z modelem termoregulacji pasywnej (dla symulacji w stanie ustalonym stanu termoneutralnego)	165
B.4. Człony źródłowe równania Pennesa z modelem termoregulacji pasywnej (dla symulacji w stanie nieustalonym)	168
B.5. Pomocnicze funkcje użytkownika dla modelu termoregulacji aktywnej . . .	171
B.6. Człony źródłowe równania Pennesa z modelem termoregulacji aktywnej (dla symulacji w stanie ustalonym stanu termoneutralnego)	174
B.7. Człony źródłowe równania Pennesa z modelem termoregulacji aktywnej (dla symulacji w stanie nieustalonym)	177
Streszczenie	182